

УДК 621.311.22

**А. С. МАЗУРЕНКО, А. Е. ДЕНИСОВА, В. В. КАНДЕЕВА, Л. Б. ГУБАРЬ****ПАРОГАЗОВАЯ УСТАНОВКА ПОВЫШЕННОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ НЕОБРАТИМОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В КОТЛЕ УТИЛИЗАТОРЕ**

Максимально достижимая эффективность парогазовых энергетических установок определяется, в первую очередь, начальными и конечными параметрами (давлением, температурой) комбинированного цикла. В настоящее время, практически исчерпаны технические и экономические возможности существенного расширения диапазона этих параметров. Представляет определенный интерес возможность повышения показателей ПГУ с котлами-утилизаторами за счет снижения необратимости в процессе теплообмена между продуктами сгорания и рабочим телом (вода, пар) паротурбинной части. Применение параллельного потока газов в котле-утилизаторе позволяет достичь поставленной цели и несколько поднять эффективность ПГУ без существенного ее усложнения и удорожания.

**Ключевые слова:** парогазовая установка, энергетическая эффективность, необратимость теплообмена, котел-утилизатор.

**А. С. МАЗУРЕНКО, А. Е. ДЕНИСОВА, В. В. КАНДЕЕВА, Л. Б. ГУБАРЬ****ПАРОГАЗОВА УСТАНОВКА ПІДВИЩЕНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ ЗА РАХУНОК ЗНИЖЕННЯ НЕЗВОРОТНОСТІ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В КОТЛІ УТИЛІЗАТОРІ**

Максимально достижимая эффективность парогазовых энергетических установок определяется, в первую очередь, начальными и конечными параметрами (давлением, температурой) комбинированного цикла. В настоящее время, практически исчерпаны технические и экономические возможности существенного расширения диапазона этих параметров. Представляет определенный интерес возможность повышения показателей ПГУ с котлами-утилизаторами за счет снижения необратимости в процессе теплообмена между продуктами сгорания и рабочим телом (вода, пар) паротурбинной части. Применение параллельного потока газов в котле-утилизаторе позволяет достичь поставленной цели и несколько поднять эффективность ПГУ без существенного ее усложнения и удорожания.

**Ключевые слова:** парогазовая установка, энергетическая эффективность, необратимость теплообмена, котел-утилизатор.

**A. S. MAZURENKO, A. E. DENYSOVA, V. V. KANDEEVA, L. B. GUBAR****COMBINED-CYCLE INSTALLATION INCREASED EFFICIENCY BY REDUCING THE IRREVERSIBILITY OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN WASTE HEAT BOILER**

The maximum achievable efficiency of combined-cycle power plants is determined, first of all, by the initial and final parameters (pressure, temperature) of the combined cycle. At the present time, technical and feasible technical and economic opportunities for significantly expanding the range of these parameters are practically exhausted. The particular interest has the possibility of increasing of combined-cycle power plants indicators with waste heat boilers by reducing the irreversibility of heat exchange process between the combustion products and the working body (water, steam) of the steam turbine part. The use of a parallel gas flow in the recovery boiler allows achieving the set goal and increasing the efficiency of combined-cycle power plants without its substantive complication and rise in price.

**Key words:** combined-cycle plant, energy efficiency, heat exchange irreversibility, waste heat boiler.

**Введение.** В настоящее время парогазовые энергетические установки (ПГУ) обладают наивысшей эффективностью процесса преобразования тепла в работу. За счет совершенствования как цикла ПГУ, так и используемого основного и вспомогательного оборудования удается достичь значения абсолютного электрического КПД 55–60% [1]. Показатель эффективности ПГУ достаточно сильно зависит, в первую очередь, от параметров газа перед газовой турбиной и давления в конденсаторе паровой турбины. Это совершенно закономерно, поскольку

именно эти параметры определяют эффективность эквивалентного цикла Карно парогазовой установки [1–4]:  $\eta_i = 1 - (T_{2m} / T_{1m})$ , где  $T_{1m}$  – средняя термодинамическая температура в процессе подвода тепла к комбинированному циклу, который происходит в камере сгорания ГТУ, К;  $T_{2m}$  – средняя термодинамическая температура в процессе отвода тепла от комбинированного цикла, который происходит в основном в конденсаторе паровой турбины, а также, частично, с уходящими газами после котла утилизатора, К (рис. 1) [5].

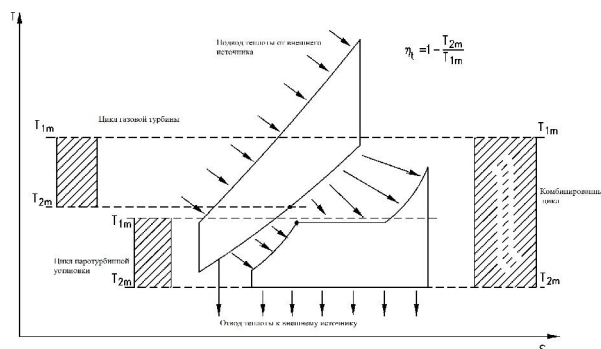


Рис. 1 – КПД эквивалентного цикла Карно парогазовой установки

© Мазуренко А.С., Денисова А.Е., Кандеева В.В., Губар Л.Б. 2018

Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, 2018. № 18 (1294)

### Постановка задачи в общем виде и ее связь с научными и практическими заданиями.

Существенное влияние параметров газа перед газовой турбиной и давления в конденсаторе паровой

турбины подтверждают результаты расчета схемы парогазовой установки трех давлений, представленной на рис. 2, с учетом контура обеспечения паром деаэратора [7–9].

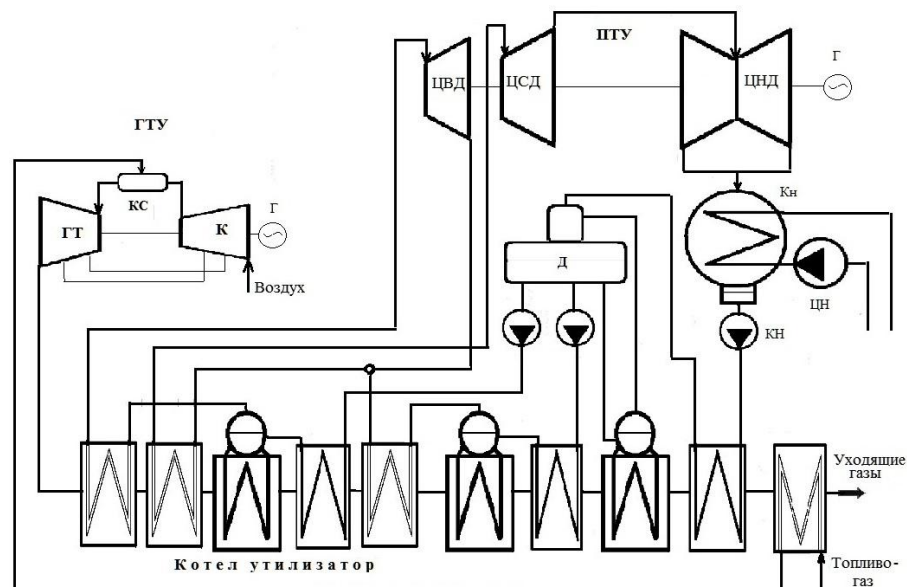


Рис. 2 – Схема парогазовой установки с котлом утилизатором и промежуточным перегревом пара

**Изложение основного материала исследования.** Результаты расчета парогазовой установки с котлом утилизатором и промежуточным перегревом пара представлены на рис. 3 и рис. 4 при стандартных параметрах окружающей среды, давлении пара перед паровой турбиной 8 МПа и температуре перегретого пара 500 °С, давлении промежуточного перегрева пара 0,9 МПа и температуре перегрева 451 °С, давлении в деаэраторе 0,3 МПа и давлении в конденсаторе 4 кПа. Температура уходящих газов, при этом, составляет около 130 °С. Анализ графиков (рис. 3, 4) показывает, что изменение экономичности при изменении температуры газа перед турбиной и давления пара в конденсаторе довольно существенное, оно составляет единицы процентов, поскольку именно эти параметры определяют

значения средних термодинамических температур в процессе подвода и отвода тепла к комбинированному циклу. Давление газа перед газовой турбиной в рассмотренном диапазоне изменения параметров влияет очень незначительно.

Однако, возможностей существенного повышения экономичности ПГУ за счет снижения средней термодинамической температуры в процессе отвода теплоты нет, так как снижение давления и температуры конденсации в конденсаторе ограничено условиями окружающей среды, то есть температурами воздуха или воды в водоемах. В этих условиях выбор оптимального давления в конденсаторе является чисто технико-экономической задачей [10], поскольку приближение к температуре охлаждающего источника связано со значительными затратами на конденсатор и систему циркуляционного водоснабжения.

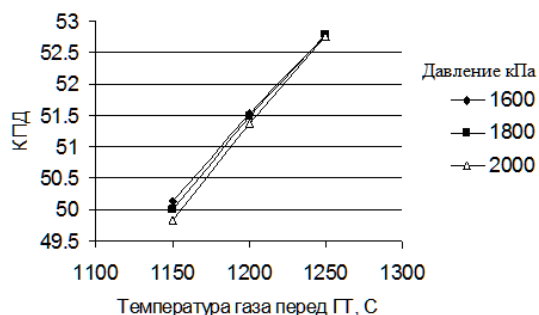


Рис. 3 – Зависимость КПД ПГУ от температуры газа перед турбиной при изменении давления газа перед турбиной от 1600 до 2000 кПа

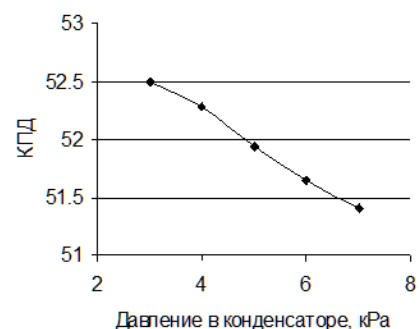


Рис. 4 – Зависимость КПД ПГУ от давления в конденсаторе паровой турбины

Существенного увеличения эффективности парогазовых установок можно достичь за счет повышения температуры газа перед турбиной и это общеизвестный путь. Однако в настоящее время уже практически достигнут предел возможных температур для современных материалов, используемых для изготовления лопаточных аппаратов газовых турбин. Дальнейшее увеличение газа перед турбиной достигается огромными затратами на лопаточные аппараты, а также затратами на их охлаждение. Кроме того, интенсификация процессов охлаждения лопаточных аппаратов приводит к заметному снижению экономичности собственно газотурбинной установки ПГУ.

Если проанализировать для рассмотренной выше схемы влияние на экономичность начальных параметров паротурбинной части, представленное на рис. 5, то можно установить, что влияние промежуточных для комбинированного цикла параметров пара паровой турбины (давление и температура перед ЦВД турбины, температура промежуточного перегрева пара) очень незначительно сказываются на эффективности всего цикла. Это влияние практически на порядок меньше, чем влияние параметров рабочего тела перед газовой

турбиной, и составляет десятые доли процента. В этой части комбинированного цикла следует стремиться лишь к снижению необратимости происходящих процессов теплообмена между газами и пароводяным рабочим телом.

Резервом дальнейшего повышения экономичности современных парогазовых установок может служить совершенствование основного и вспомогательного оборудования парогазовых циклов, в первую очередь паровой турбины, а также совершенствование процессов передачи тепла от газов к пароводяному циклу с минимальными потерями эксергии тепловых потоков. На рис. 5 представлено распределение температур теплоносителей для этой схемы.

Анализ процессов теплообмена газ – пар и вода показывает, что перепады температур между греющей и нагреваемой средой значительны, иногда достигают 170–200 °С. Наблюдаются температурные перекосы, когда среда с меньшей температурой нагревается газом, имеющим более высокую температуру, а среда с более высокой температурой нагревается газом с низкой температурой. Это наблюдается, в частности, в области пароводяного тракта среднего давления и экономайзера высокого давления.

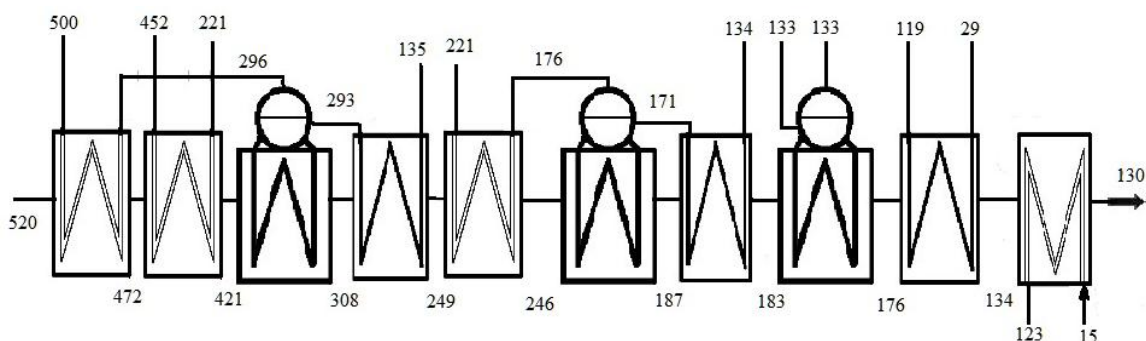


Рис. 5 – Распределение температур по газопароводяному тракту

Для снижения температурного перепада между газами и рабочим телом парового цикла, что приведет, естественно, к снижению необратимости в процессе теплообмена, предлагается использовать параллельную схему подогрева питательной воды контура высокого давления и рабочего тела (вода, насыщенный и перегретый пар) контура среднего давления. Схема такой парогазовой установки с параллельными потоками газа в котле-утилизаторе представлена на рис. 6. Для выравнивания температур газа при его смешении перед испарителем низкого давления (а значит, для снижения необратимости процесса смешения) в расчет заложен макрос, перераспределяющий, соответствующим образом, параллельные потоки газа. С этой же целью используется макрос

выравнивания температур смешения пара в смесителе после ЦВД и пароперегревателя среднего давления изменением температуры промежуточного перегрева.

#### Анализ результатов исследования экономичности рассматриваемой ПГУ.

Результаты исследования экономичности такой ПГУ представлены на рис. 7. Анализ полученных результатов показывает, что характер зависимостей эффективности цикла ПГУ от параметров пара изменился мало, однако введение параллельного подогрева позволило несколько повысить КПД, по сравнению с данными, полученными для схемы с котлом-утилизатором и промежуточным перегревом пара, представленной на рис. 2.

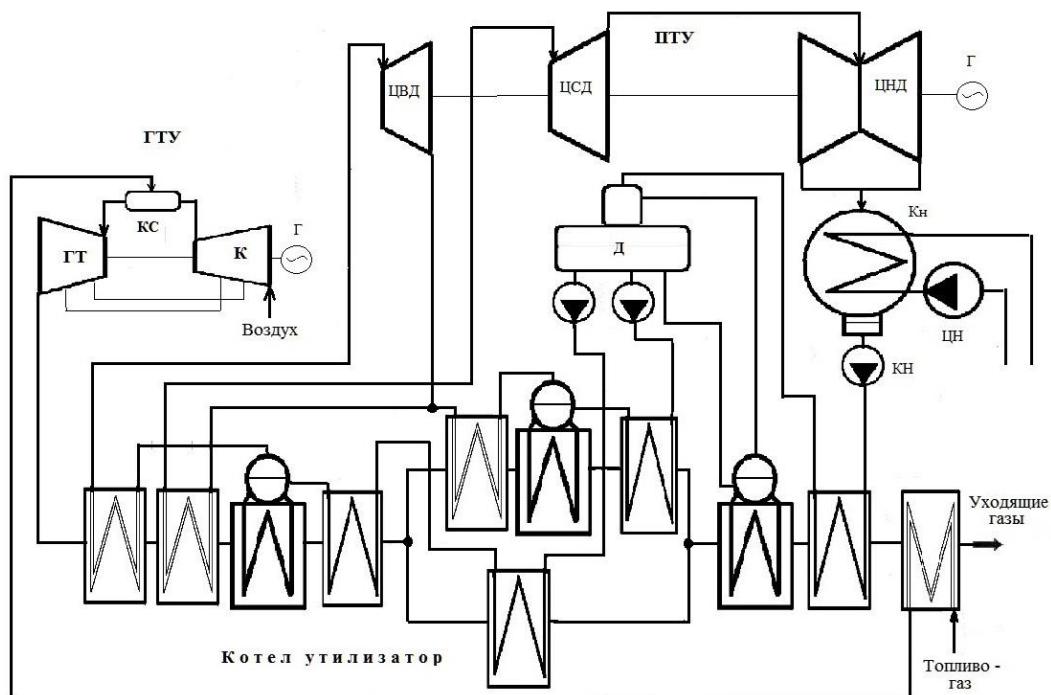


Рис. 6 – Схема парогазовой установки с параллельными потоками газа в котле утилизаторе

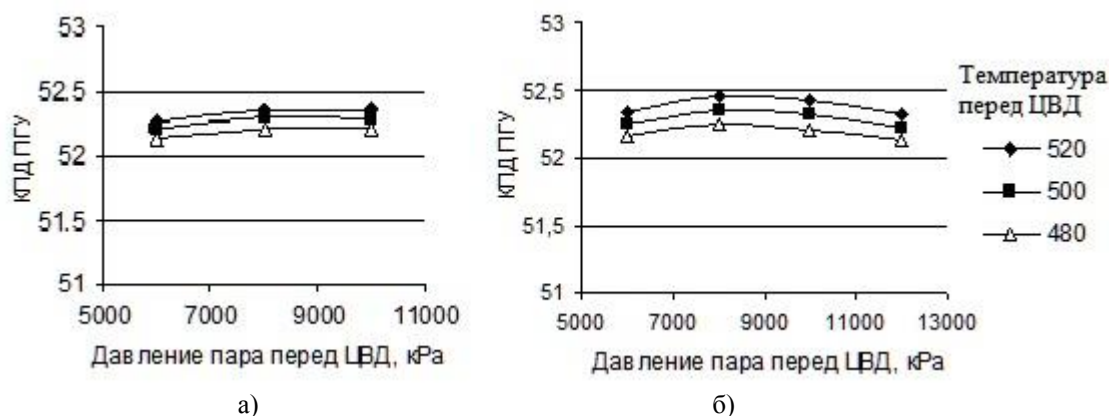


Рис. 7 – Изменение эффективности ПГУ при традиционной схеме и схеме ПГУ с параллельными потоками газа:  
 а) исходная однопоточная схема при температуре промежуточного перегрева 451 °C (рис. 2)  
 б) при параллельных потоках газа и температуре промежуточного перегрева 446 °C (рис. 7)

### Выводы и перспективы дальнейшего развития данного направления

1. Реальным резервом повышения эффективности современных парогазовых установок является совершенствование основного и вспомогательного оборудования паротурбинной части.

2. Повышению экономичности ПГУ способствует совершенствование процессов передачи тепла от газа к пароводяному тракту путем снижения

температурных напоров, предотвращением смешения потоков с разным потенциалом

3. Изменение параметров пара паротурбинной части парогазовых установок за счет использования тепла газов после ГТУ не позволяет существенно повысить КПД всей энергоустановки

### Список литературы:

1. *Енергетична стратегія України на період до 2030 року* // Інформаційно-аналітичний бюлетень «Відомості Міністерства палива та енергетики України». Спеціальний випуск. 2006. 113 с.

2. Мазуренко А. С. Эффективность ГТУ при зміні співвідношення виробництва теплоти та електроенергії / А. С. Мазуренко, Г. А. Баласанян, Е. А. Сычева // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2006, № 5. С. 49–52.



3. Мазуренко А. С. Экономическая эффективность парогазовых установок на биотопливе / А. С. Мазуренко, А. Е. Денисова, Нго Минь Хиеу // *Энергетика: экономика, технологии, экология*. 2013. №1 (32). С. 15–19.
4. Семиноженко В. П. *Энергия. Экология. Будущее* / Семиноженко В. П., Канило П. М., Остапчук В. И., Ровенский А. И. – Х.: Прапор, 2003. 463 с.
5. Андрищенко А.Н. *Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок: учебное пособие* / А. И. Андрищенко. – 3-е изд. перераб. и доп. Высшая школа. М.: 1985. 319 с.
6. Баласанян Г. А. Повышение эффективности системы энергоснабжения на базе установки когенерации малой мощности / Г. А. Баласанян, А. С. Мазуренко, Е. А. Сычева. – К.: *Новини енергетики*, 2005. № 3. С. 34–38.
7. Мазуренко А.С. Эффективность регулирования отпуска теплоты когенерационной газотурбинной установкой / А. С. Мазуренко, Г. А. Баласанян, Е. А. Сычева // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – Х.; 2005. Вып. 6. С. 108–112.
8. Денисова А. Е. Оценка эффективности биогазовых электростанций / Денисова, А. Е., Нго Минь Хиеу // *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*, 2013, № 5–6. С.118–122.
9. Мазуренко А. С., Баласанян Г. А., Сычева Е. А.. Оцінка ефективності когенераційних ГТУ при зміні співвідношення виробництва теплоти та електроенергії // *Вісник НТУ «ХПИ»*. Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2006. Вып. 5. С. 133–136.
10. Джордж Тсатсаронис. *Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы*. – Одесса: ООО «Студия «Негоциант», 2002. 152 с.
2. Mazurenko A. S. Efektivnist' GTU pri zmini spivvidnoshennja virobnictva teploti ta elektroenergii / A. S. Mazurenko, G. A. Balasanjan, E. A. Sycheva // *Jenergeticheskie i teplotehneskie processy i oborudovanie*. 2006, № 5, pp. 49–52.
3. Mazurenko A. S. Jekonomicheskaja jeffektivnost' parogazovyh ustanovok na biotoplive / A. S. Mazurenko, A. E. Denysova, Ngo Min' Hieu // *Jenergetika: jekonomika, tehnologija, jekologija*. 2013. №1 (32), pp. 15–19.
4. Seminozhenko V. P. *Jenergija. Jekologija. Budushhee* / Seminozhenko V.P., Kanilo P.M., Ostapchuk V.I., Rovenskij A.I. Kharkov : Prapor, 2003. 463 p.
5. Andrijushhenko A.N. *Osnovy termodinamiki ciklov teplotenergeticheskikh ustanovok: uchebnoe posobie* / A. I. Andrijushhenko. 3-e izd. pererab. i dop. Vysshaja shkola. M.: 1985. 319 p.
6. Balasanjan G. A. Povyschenie jeffektivnosti sistemy jenergosnabzhenija na baze ustanovki kogeneracii maloj moshhnosti / G. A. Balasanjan, A. S. Mazurenko, E. A. Sycheva. K.: *Novini energetiki*, 2005. № 3, pp. 34–38.
7. Mazurenko A.S. Jefferktivnost' regulirovaniya otpuska teploty kogeneracionnoj gazoturbinnoj ustanovkoj / A. S. Mazurenko, G. A. Balasanjan, E. A. Sycheva // *Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]*. Kharkov, NTU "KhPI" Publ. 2005. Vyp. 6, pp. 108–112.
8. Denysova A. E. Ocenka jefferktivnosti biogazovyh jelektrostantsij / Denysova, A. E., Ngo Min' Hieu // *Zbirnik naukovih prac' Nacional'nogo universitetu korablebuduvannja*, 2013, № 5–6. pp.118–122.
9. Mazurenko A. S., Balasanjan G. A., Sycheva E. A.. Ocinka efektnosti kogeneracijnih GTU pri zmini spivvidnoshennja virobnictva teploti ta elektroenergii // *Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]*. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2006. – Vyp. 5. pp. 133–136.
10. Dzhordzh Tsatsaronis. *Vzaimodejstvie termodinamiki i jekonomiki dlja minimizacii stoimosti jenergoobrazujushhej sistemy*. – Odessa: ООО «Студия «Негоциант», 2002. – 152 p.

#### Bibliography (transliterated):

1. *Energetichna strategija Ukraïni na period do 2030 roku // Informacijno-analitichnij bjuleten' «Vidomosti Ministerstva paliva ta energetiki Ukraïni»*. Special'nij vipusk. 2006. 113 p.

Поступила (received) 23.05.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Мазуренко Антон Станіславович (Mazurenko Anton Stanislavovich, Mazurenko Anton Stanislavovich)** – доктор технічних наук, професор кафедри теплових електричних станцій і енергозберігаючих технологій, Одеський національний політехнічний університет; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0165-3826>; e-mail: [antmaz46@gmail.com](mailto:antmaz46@gmail.com)

**Денисова Алла Євсївна (Денисова Алла Евсеевна, Denysova Alla Evsiivna)** – доктор технічних наук, професор кафедри теплових електричних станцій і енергозберігаючих технологій, Одеський національний політехнічний університет; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3906-3960> ; e-mail: [alladenysova@gmail.com](mailto:alladenysova@gmail.com)

**Кандєєва Віра Валерїївна (Kandeeva Vsra)** – кандидат економічних наук, доцент кафедри теплових електричних станцій і енергозберігаючих технологій, Одеський національний політехнічний університет; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8707-0700> ; e-mail: [vkandeeva@gmail.com](mailto:vkandeeva@gmail.com)

**Губар Лілія Борисївна (Губарь Лилия Борисовна, Gubar Lily Borysivna)** – спеціаліст, ст викладач кафедри теплових електричних станцій і енергозберігаючих технологій, Одеський національний політехнічний університет; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2884-6668> ; e-mail: [lilygubar1@gmail.com](mailto:lilygubar1@gmail.com)